

## EL SISTEMA JRODOS: UNA HERRAMIENTA MODERNA Y EFICAZ PARA LA GESTIÓN Y PREPARACIÓN DE EMERGENCIAS NUCLEARES Y RADIOLÓGICAS Y LA REHABILITACIÓN. IMPLEMENTACIÓN EN ESPAÑA.

M. Montero<sup>1,\*</sup>, A. Dvorzhak<sup>1</sup>, E. Gallego<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CIEMAT, Departamento de Medio Ambiente, Av. Complutense, 22, Madrid.

<sup>2</sup>ETSII-UPM, Departamento de Ingeniería Nuclear, C/ José Gutiérrez Abascal, 2, Madrid.

### RESUMEN

En los últimos años se ha producido un significativo avance en el área de la gestión de las emergencias nucleares y radiológicas y la rehabilitación. Proyectos de alcance europeo como EURANOS han contribuido a mejorar los procesos de gobernanza participativa iniciados durante los anteriores Programas Marco Europeos y el desarrollo de técnicas y metodologías en todos los niveles operativos en materia nuclear y radiológica. El sistema de ayuda a la decisión (SAD) RODOS es uno de los productos desarrollados durante este periodo y que ha ido siendo mejorado hasta convertirse en un sistema de uso operacional ampliamente difundido y asumido en todo el ámbito europeo y que empieza a extenderse también a otras zonas del mundo. En España, ha sido implementado y adaptado a las características nacionales en el contexto del Proyecto ISIDRO, patrocinado por el CSN, con la participación del CIEMAT y la UPM. El objetivo de este trabajo es dar a conocer la última versión de este sistema, denominado JRODOS, centrándose en su adaptación al entorno nacional y su aplicación como herramienta operacional en la gestión y preparación de las emergencias y la rehabilitación de zonas contaminadas.

**Palabras claves:** Emergencias nucleares; emergencias radiológicas; rehabilitación post-accidente; gestión post-accidente; sistemas de ayuda a la decisión.

### ABSTRACT

In recent years there has been significant progress in the area of management of nuclear and radiological emergencies and rehabilitation. Europe-wide projects as EURANOS have improved participatory governance processes initiated during the previous European Framework Programmes and the development of techniques and methodologies in all operational levels in nuclear and radiological matters. The decision support system (DSS) RODOS is one of the products developed during this period and has been being improved to become an operating system widely used and accepted throughout the European level and beginning to extend to other world regions. In Spain, has been implemented and adapted to national characteristics in the context of the ISIDRO Project, sponsored by the CSN, with the participation of CIEMAT and UPM. The aim of this paper is to present the latest version of this system, named JRODOS, focusing on their national adaptation and its application as an operational tool in the management and preparedness for emergencies and rehabilitation of contaminated sites.

**Key Words:** Nuclear emergencies, radiological emergencies, post-accident rehabilitation, post-accident management, decision support systems.

### Introducción.

A raíz de la experiencia obtenida con el accidente de Chernobil se pusieron de manifiesto importantes carencias en las disposiciones administrativas, organizativas y técnicas existentes en la gestión de

---

\* [milagros.montero@ciemat.es](mailto:milagros.montero@ciemat.es)

emergencias en Europa. El proyecto **RODOS**<sup>6</sup> (*Real time On-line DecisiOn Support for off-site emergency management*) se estableció para responder a estas necesidades, marcándose como objetivos principales: a) obtener un sistema de apoyo a la decisión global e integrado de aplicación general en toda Europa; b) proporcionar un marco común para la incorporación de las mejores características de los sistemas de apoyo a las decisiones y desarrollos futuros; c) proporcionar una mayor transparencia en el proceso de la decisión como una entrada para mejorar la comprensión y aceptación pública y social de las medidas de emergencia fuera del emplazamiento; d) facilitar una mejor comunicación entre los países de los datos de seguimiento, las predicciones de las consecuencias, etc., en caso de cualquier accidente futuro, e) promover, a través del desarrollo y el uso del sistema, una respuesta más coherente, sólida y armonizada a cualquier futuro accidente que pueda afectar Europa. Iniciado en 1989, se desarrolló a través del 3<sup>er</sup>, 4<sup>o</sup> y 5<sup>o</sup> Programas Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Comisión Europea en el área de la Protección Radiológica. El resultado fue un Sistema global de Ayuda a la toma de Decisiones (SAD), denominado RODOS, para las emergencias exteriores, aplicable para toda Europa, para cualquier tipo de accidente nuclear y comprendiendo todas las fases del accidente, incluyendo la gestión y restauración de las áreas contaminadas en el largo plazo [1].

Bajo el Proyecto **EURANOS**<sup>7</sup> (*EUROpean Approach to Nuclear and radiological emergency management and rehabilitatiOn Strategies*) del 6<sup>o</sup> PM-EURATOM, finalizado en 2009 y en el que han participado CIEMAT, UPM y CSN, este sistema se ha revisado, actualizado y armonizado con el objetivo de obtener una herramienta de gestión de la emergencia de uso plenamente operacional. El establecimiento del Grupo de Usuarios de RODOS (RUG) como foro de discusión e interacción para coordinar y gestionar las actividades relacionadas con la demostración y la mejora del sistema facilitó esta tarea al proporcionar una retroalimentación esencial entre usuarios y desarrolladores. Mejoras, como la extensión del alcance de su utilización a otros accidentes radiológicos, la migración a otros sistemas operativos más modernos y prácticos, como LINUX, el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario más sencilla y, finalmente, la presentación de una versión completamente re-diseñada, llamada JRODOS, han permitido ampliar la red de usuarios a, prácticamente, todo el ámbito europeo y a países de otras regiones del globo (Argentina, Brasil, Sudáfrica o China). El primer prototipo se liberó al final del proyecto EURANOS y se espera que una versión completa y operativa se presente en próximas fechas [2].

Actualmente, tanto el RUG, como grupos de discusión para la mejora y actualización de los SADs, se mantienen bajo la Plataforma Tecnológica Europea **NERIS**<sup>8</sup> (*European platform on preparedness for NuclEar and RadIological emergency reSponse and recovery*) que opera desde 2010 animando a la participación conjunta de todas las organizaciones e instituciones interesados en estos temas. Por otro lado, el proyecto **NERIS-TP**<sup>9</sup> (*Towards a self sustaining European Technology Platform (NERIS-TP) on Preparedness for Nuclear and Radiological Emergency Response and Recovery*) del 7<sup>o</sup> PM-EURATOM, además de promover el funcionamiento futuro de la Plataforma, pretende desarrollar los aspectos metodológicos y modelos computacionales necesarios compatibles con las últimas recomendaciones de la CIPR (Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones) y mejorar la respuesta en Europa, mediante el desarrollo de una interfaz Web que acople los SAD con un sistema de información de emergencia junto con una cadena de modelos meteorológicos que proporcionen datos de libre disposición para las evaluaciones.

En España, el sistema en sus diversas versiones ha sido implementado y adaptado a las características nacionales en el contexto del Proyecto **ISIDRO** (*Integración del SIstema de ayuda a la Decisión RODos en la sala de emergencias (SALEM) del CSN*), patrocinado por el CSN, con la participación del CIEMAT y la ETSII-UPM. En el CIEMAT y en la UPM se utiliza con propósitos de apoyo científico-técnico y en estudios de análisis, validación, formación y entrenamiento; y en el CSN, como sistema preoperacional. Actualmente, se está adaptando la última versión del código, JRODOS, en el marco de sendas

<sup>6</sup> <http://www.rodos.fzk.de>

<sup>7</sup> <http://www.euranos.fzk.de/>

<sup>8</sup> <http://www.eu-neris.net/>

<sup>9</sup> <http://resy5.fzk.de/NERIS-TP/>

colaboraciones con el CIEMAT (**ACCROS**, *Actualización, Configuración y adaptación básica al entorno español del sistema JRODOS instalado en la SALEM del CSN*) y con la ETSII-UPM.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer la versión JRODOS, puesto que a corto plazo se prevé que sea la única versión del código que se mantenga y se actualice con los resultados del proyecto NERIS-TP, centrándose en el estado de su adaptación al entorno nacional y su aplicación como herramienta operacional en la gestión y preparación de las emergencias y la rehabilitación de zonas contaminadas.

### Descripción general y estructura funcional del sistema RODOS

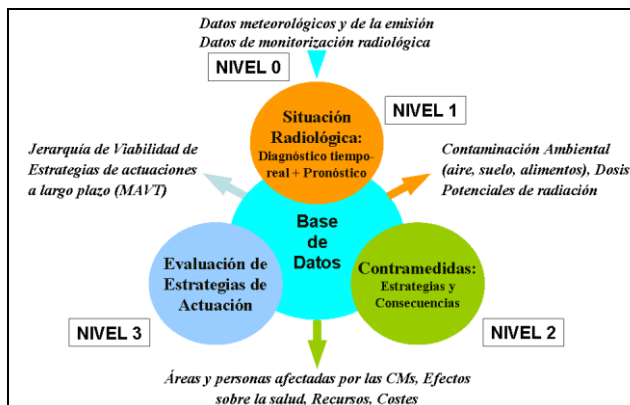
**RODOS** (*Real-time On-line DeciSiOn Support system*) es un sistema de apoyo para la toma de decisión, evaluación, presentación y evaluación de las consecuencias de accidentes nucleares y radiológicos. Ha sido diseñado como un sistema global destinado a ser usado por múltiples usuarios en los centros responsables de emergencias a nivel nacional o regional, que incorpora modelos, bases de datos y conexiones *on-line*, pudiendo utilizar información en tiempo real o introducida por el usuario, para la evaluación, presentación y pronóstico de las consecuencias de una emisión radiactiva accidental a cualquier distancia y en todas las fases temporales del accidente, teniendo en cuenta el efecto de las medidas para mitigar el suceso y su potencial viabilidad técnica, económica o social. Este desarrollo conceptual, que se puede representar con la Figura 1, nos indica que el sistema RODOS está concebido para proporcionar apoyo a la toma de decisiones a cuatro niveles distintos [3]:

**Nivel 0:** Adquisición y verificación de los datos radiológicos y su representación, directa o con mínimos análisis, junto con información geográfica y demográfica.

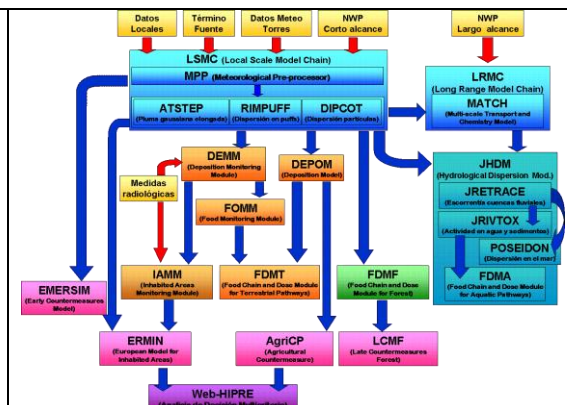
**Nivel 1:** Análisis y predicción de la situación radiológica actual y futura (distribución en el espacio y el tiempo del material radiactivo en ausencia de las contramedidas) basada en los datos de la vigilancia ambiental, datos meteorológicos y modelos, incluyendo información sobre el término fuente.

**Nivel 2:** Simulación de las contramedidas potenciales (confinamiento, evacuación, administración de tabletas de yodo, reubicación, descontaminación y restricción de alimentos...) en particular, determinación de su viabilidad y cuantificación de sus beneficios y desventajas.

**Nivel 3:** Evaluación y jerarquización de las estrategias de remediación alternativas mediante la compensación de sus respectivos beneficios y desventajas (costes, dosis evitadas, reducción de la ansiedad y el estrés, aspectos socio-psicológicos, aceptación política...) teniendo en cuenta los juicios y preferencias de los decisores.



**Fig. 1** Desarrollo conceptual de RODOS abarcando los cuatro niveles de apoyo a la toma de decisiones.



**Fig. 2** Esquema de la estructura conceptual mostrando la composición e interconexiones de los módulos de cálculo que están implementados en la versión JRODOS.

La arquitectura conceptual de RODOS se estructura de forma modular en subsistemas independientes [4], compuestos por módulos de cálculo desarrollados para procesar los datos y calcular los resultados pertenecientes al correspondiente nivel de procesamiento de la información. Una descripción de los modelos fundamentales se puede encontrar en [5], y de los últimos desarrollos en [6]. En la Figura 2 se

muestra la interrelación de los modelos de cálculo implementados en la versión JRODOS en relación a la estructura conceptual del sistema, tal y como se define a continuación:

Subsistema de Análisis (ASY). Su objetivo es actualizar continuamente el diagnóstico y pronóstico de la situación radiológica. Los módulos principales integrados en ASY se pueden diferenciar en tres tipos :

Modelos de transporte y dispersión atmosférica, alimentados con datos meteorológicos procedentes de la observación o de modelos de predicción numérica (NWP): A escala local (LSMC), anida un pre-procesador meteorológico, un modelo local de campos de viento y tres modelos de cálculo de la dispersión atmosférica (ATSTEP, RIMPUFF y DIPLOT); Para la evaluación de largo alcance, un modelo (MATCH), que puede actuar de forma autónoma alimentado con datos NWP de ALADIN/HIRLAM o conectado a los resultados del LSMC.

Cadenas de modelos radioecológicos y de dosis para todas las vías de exposición, que calculan: La concentración de actividad, ya sea depositada en suelo, vegetación y otras superficies terrestres (DepoM), o dispersada en los sistemas acuáticos (J-RETRACE, J-RIVTOX incluidos en el módulo JHDM); La transferencia de la actividad a través de la cadena alimentaria y las dosis en ecosistemas terrestres agrícolas (FDMT), semi-naturales (FDMF) y acuáticos (FDMA).

Modelos de asimilación de datos para, a partir de datos de monitores de radiación: Actualizar el depósito pronosticado en el terreno y vegetación (DEMM); Corregir las concentraciones de actividad en alimentos y forrajes (FOMM); Generar el mapa de concentración de actividad inicial en las áreas urbanas (IAMM).

Subsistema de Contramedidas (CSY). Su objetivo es la estimación de la magnitud y duración de las posibles actuaciones de remediación o contramedidas, así como sus consecuencias. El módulo CSY contiene:

Modelos de simulación para las medidas de protección de emergencia (EMERSIM): confinamiento, evacuación y profilaxis con yodo.

Modelos para evaluar las contramedidas en el largo plazo en los diferentes medios contaminados: áreas urbanas (ERMIN), áreas agrícolas (AgriCP), medios acuáticos (LCMA) y semi-naturales (LCMF).

Modelos para calcular los efectos deterministas y estocásticos sobre la salud y para estimar el coste económico de las medidas y efectos a la salud (No implementados en JRODOS).

Subsistema de Evaluación (ESY). Su objetivo es la evaluación y clasificación de las distintas estrategias alternativas de intervención obtenidas en los módulos anteriores, mediante la ponderación de sus beneficios y desventajas incluyendo tanto las posibles restricciones a su implementación (viabilidad, aceptación pública), como las opiniones y preferencias de los decisores, y los aspectos políticos y socio-psicológicos que las rodeen.

Subsistema Operativo (OSY). Este subsistema, con funciones de cliente-servidor, controla la interconexión de todos los módulos del programa, las entradas, la transferencia e intercambio de datos, la presentación de los resultados y los modos de ejecución del sistema, que pueden ser:

Ejecución Automática, en la que se realizan ciclos de diagnóstico y de pronóstico controlados por el sistema en una secuencia específica de modelos y limitado al entorno cercano alrededor de la instalación, trabajando en modo de Operación Normal (realizando una monitorización de la operación de la instalación durante un tiempo indefinido con pronósticos limitados a un tiempo de 24 horas) o en modo de Operación de Emergencia (se dispara cuando hay una emisión radiactiva al exterior, ejecutando ciclos de diagnóstico y pronóstico de la situación durante el tiempo de permanencia de la pluma en el área de cálculo o mientras haya datos de pronóstico meteorológico.).

Ejecución Interactiva, en la que el usuario define la entrada, la cadena de modelos de cálculo y el alcance temporal y físico de la evaluación, pudiendo utilizar datos de entrada, históricos o en tiempo-real. Con este tipo de ejecución se puede evaluar la fase de emergencia y la fase post-accidente en el largo plazo.

Además, el sistema RODOS ofrece **interfaces** integradas y herramientas apropiadas para gestionar la información de entrada y los resultados que se almacenan en diferentes **Bases de Datos**. Esta información se puede dividir entre:

Información cartográfica y geográfica: Coberturas geo-espaciales básicas de fondo (Mapas de regiones



administrativas, áreas urbanas, vías de transporte); Datos temáticos georreferenciados (elevación, uso del suelo, población, tipo de suelo, producción, etc.)

Datos Básicos representativos del emplazamiento y del tipo de accidente: Características de las instalaciones y emplazamientos nucleares, incluyendo los inventarios; Términos fuente necesarios para el modo de Operación Normal en Diagnóstico y específicos del usuario; Nucleidos por defecto para los rangos cercano y lejano.

Datos recibidos en tiempo real: Medidas radiológicas procedentes de la emisión desde la chimenea, y de las redes de vigilancia locales y nacionales (incluyendo EURDEP); Observaciones de datos meteorológicos; Datos de modelos de predicción numérica meteorológica (NWP) de corto y largo alcance.

Datos de operación de los módulos de cálculo (valores comunes y regionales de los parámetros y resultados).

### Particularidades del código JRODOS

JRODOS [7] es la versión más moderna del sistema, desarrollado siguiendo las directrices marcadas por los usuarios del sistema [8]:

Se puede utilizar en diferentes plataformas de trabajo, como Windows, Linux o MacOS.

Soporta un enfoque multi-usuario.

Tiene una arquitectura distribuida aplicable en diferentes ambientes.

Utiliza una interfaz Gráfica (GUI) de uso más fácil y que presenta resultados más convenientes.

Mantiene la interfaz de usuario RODOS-Lite como entrada a la evaluación en la fase temprana del accidente.

Preserva los modelos fundamentales de cálculo usados en el sistema RODOS (ver en el punto anterior), además de permitir una integración fácil de los nuevos desarrollos.

Trabaja con generadores de bases de datos modernos que se pueden ejecutar separadamente.

Utiliza un subsistema GIS que se basa en estándares más modernos y comunes.

La adaptación a las condiciones nacionales es más fácil y rápida.

### Desarrollo y estructura funcional

Se ha utilizado Java como lenguaje de programación para desarrollar JRODOS porque este lenguaje se puede aplicar de forma independiente al sistema operativo instalado y ofrece una potente GUI y soluciones de gestión de la información.

JRODOS se ha desarrollado como un sistema distribuido (Figura 3) con un **Motor Computacional** para realizar cálculos, un **Servidor de Gestión** del sistema (SMS en sus siglas en inglés) para acceder a la base de datos y recoger e intercambiar datos e información entre los componentes del sistema y el **Cliente** para capturar la información de entrada, visualizar resultados y ejecutar la aplicación de mensajería.

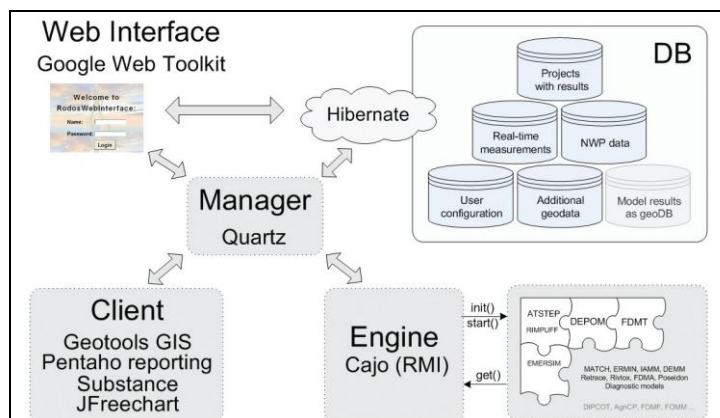


Fig. 3 Estructura del software JRODOS.

Gracias a las librerías de código abierto con licencia propia (LGPL, BSD, MIT<sup>10</sup>), que proporciona JAVA se han acelerado y mejorado importantes aspectos funcionales, como son:

Procesamiento y visualización de los datos geográficos, utilizando un potente sistema GIS (Geotools) que soporta la representación y análisis de datos espaciales, estándares de datos (.shp, .tiff) y tecnologías comunes

<sup>10</sup> <http://www.opensource.org/licenses>

(Web Map Server, conectado a PostGIS), así como el uso de Google Maps como mapa de fondo del sistema.

Gestión y almacenamiento de datos, utilizando PostgreSQL, en nuevas bases de datos: PrognoseDB (pronósticos meteorológicos); RTDB (medidas en tiempo real); ProjectDB (datos de entrada, mensajes y resultados de las ejecuciones); RoUsersDB (perfiles y preferencias del usuario); ModelDB (Parámetros de los módulos de cálculo); GeoDB (datos temáticos y resultados georreferenciados); GIS Data (Coberturas y mapas geográficos). Este motor se puede implantar y usar en máquinas separadas del núcleo central de JRODOS, permitiendo que varios Clientes se conecten y compartan los datos.

Generación de informes a partir de los resultados de los cálculos, de forma manual o automática; se pueden diseñar al gusto del usuario y se pueden salvar, almacenar o imprimir en formatos .pdf, xls, html, rtf, etc. (JFreeReport y JFreeChart)

Mapeo objeto-relacional (ORM), con Hibernate, para convertir datos entre el sistema de tipos utilizado en la base de datos relacional en el entorno Java y el del lenguaje de programación orientado a objetos de la aplicación utilizando un motor de persistencia. Además, proporciona capacidades para la obtención y almacenamiento de datos de la base de datos que nos reducen el tiempo de desarrollo.

Los modelos computacionales con todas sus funcionalidades se integran en JRODOS como *plug-ins*. Se han realizado como librerías dinámicas compartidas, dejando el código original casi intacto, lo que permite aprovechar las ventajas de la carga e intercambio de datos llevado a cabo por el SMS.

### Estructura modular e integración de los modelos de cálculo

Varios modelos utilizan los resultados de su predecesor como entrada, formando cadenas que se extienden a lo largo de todos los niveles de procesamiento de la información, como se muestra en la Figura 2. Estas cadenas de modelos son la base para los llamados “proyectos” de JRODOS y se pueden establecer hasta el nivel que se requiera o interese en cada caso, mediante una selección por el usuario de los modelos, siguiendo sus posibles interconexiones. Un Editor de Cadenas de Modelos permite configurar de forma sencilla e intuitiva la cadena deseada. El sistema ofrece una serie de cadenas por defecto, para realizar las evaluaciones más comunes en la fase de emergencia [9]:

L+E+D+F (LSMC+EMERSIM+DepoM+FMĐT), cadena más común para realizar pronósticos y evaluación de contramedidas en la fase temprana de la emergencia;

EMERGENCY Mode, para realizar un pronóstico rápido. Utiliza la interfaz RODOS-Lite, cargando y ejecutando de forma automática la cadena de modelos L+E+D+F.

AUTOMATIC Mode, incorpora en la fase de Diagnóstico: RUMPF (RMC3diag) → ATSTEPdiag (RIMPUFFdiag) → DOSEdiag y en la fase de Pronóstico: LSMC auto → EMERSIM → DEPOM → FMĐT.

### Interfaz de usuario

La interfaz gráfica de JRODOS (GUI) [9] contiene los siguientes componentes (Figura 4):

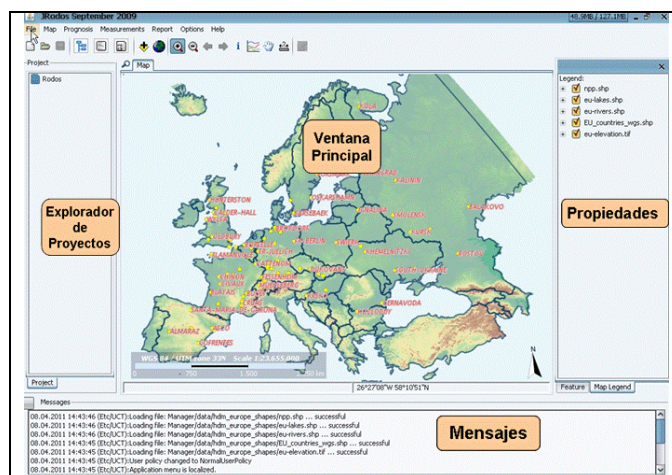
Una ventana principal, donde se muestra la información geográfica y los gráficos/tablas relacionados con el escenario analizado. Incorpora una estructura basada en pestañas, de forma que se pueden ir abriendo nuevas pestañas con cada uno de los posibles resultados de la ejecución en formato de texto, tabla o gráfico.

Un explorador de proyectos, donde se dispone toda la información del proyecto en ejecución, en forma de árbol.

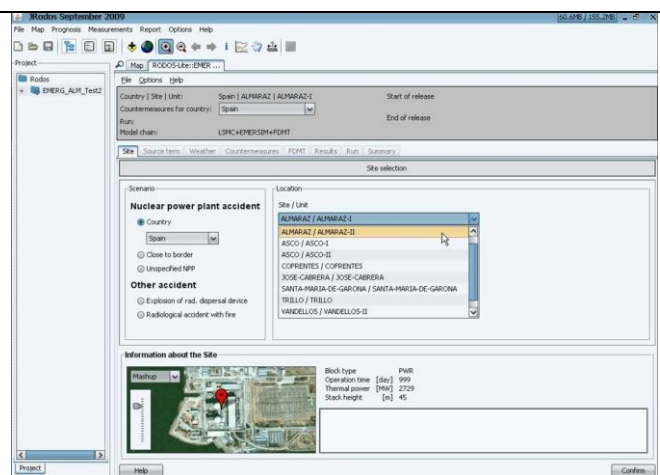
Una ventana de propiedades que muestra, organizado en forma de pestañas, la información del objeto seleccionado en la ventana principal, la estructura del informe elaborado y la leyenda del mapa.

Una ventana de mensajes, que muestra mensajes de texto relacionados con la progresión de la ejecución.

La entrada de los datos se realiza a través de la interfaz RODOS-Lite [10] que actúa como un asistente para la parametrización obligatoria de la ejecución de un nuevo proyecto. La ventana de la aplicación (Figura 5) consta de un panel de información en la parte superior y un cuerpo principal organizado en grupos lógicos de formularios de entrada de datos dispuestos como una secuencia de pestañas. Estos paneles de entrada cubren, al menos, los siguientes tópicos principales: Sitio (localización y tipo de accidente), Término fuente, Meteorología, Contramedidas, Resultados, Tipo de ejecución y Resumen. Cada formulario tiene que ser cumplimentado y confirmado para poder acceder al siguiente. Desde el panel final se envían los datos al núcleo de JRODOS para iniciar la ejecución [11].



**Fig. 4** Componentes principales de la interfaz gráfica de usuario (GUI) de la aplicación JRODOS



**Fig. 5** Interfaz de usuario RODOS-Lite mostrando el panel inicial de selección del sitio del accidente

Tras la ejecución, el sistema permite representar gráficamente muchas variables de interés para el análisis de la situación radiológica y la toma de decisiones a corto, medio y largo plazo, incluyendo la animación y visualización de las variables que varían temporalmente.

### Implementación y adaptación del sistema RODOS en España

- La implementación del sistema RODOS en el entorno nacional se ha dividido en las siguientes fases:
- Instalación del software, verificación de su funcionamiento y configuración funcional y de usuario necesarias para que cumpla los requisitos de operación en cada entorno de trabajo.
- Obtención de los datos meteorológicos y radiológicos que proceden de los sistemas de información nacionales en tiempo real y su conexión *on-line* al sistema JRODOS (caso del CSN). En el caso del CIEMAT y UPM, posibilitar la obtención de estos datos de forma diferida, tipo *depot*, desde los registros históricos del CSN.
- Adaptación del sistema RODOS en aquellos aspectos relativos al manejo y presentación de la interfaz y a la regionalización del sistema que sean imprescindibles para que sea operativo bajo los requerimientos nacionales.
- Entrenamiento y formación del personal administrador / operador del sistema en cada uno de los centros de trabajo.
- Realización de ejercicios nacionales e internacionales para analizar la operabilidad y su aplicabilidad como herramienta de apoyo al análisis y toma de decisiones tanto en la fase de emergencia como en la fase posterior de recuperación, de acuerdo con las indicaciones del Plan Básico de Emergencia Nuclear (PLABEN) [12].

A continuación se presenta de forma sucinta el proceso seguido en cada una de estas fases y el estado actual de esta implementación.

### Instalación, actualización y verificación de RODOS.

Actualmente, además de las versiones más modernas en Linux, la versión JRODOS está instalada tanto en el CIEMAT y UPM como en la SALEM del CSN. La instalación de JRODOS en el CSN se ha realizado de forma distribuida, con un equipo situado en la SALEM que actúa como servidor del sistema y de sus bases de datos, al que se conectan de forma remota los diferentes equipos que actúan como clientes y que pueden tener diferentes perfiles de usuario, según el tipo de privilegios de acceso que se tenga (administrador, operador, invitado, etc.). Mientras que aquí se ha instalado la última versión oficial (Septiembre 2009), en CIEMAT y UPM se han ido testando sucesivas versiones *beta* del sistema presentadas desde entonces por los desarrolladores. La próxima versión oficial que se liberará durante

este año, ya incorpora una estructura cliente-servidor independiente y mejoras en la funcionalidad y capacidades del sistema.

### **Conexión on-line con los proveedores de datos recibidos en tiempo real.**

La Sala de Emergencias del CSN (SALEM) recibe toda la información necesaria para determinar y coordinar las operaciones de respuesta en caso de emergencia, procedente de las centrales nucleares (CCNN), de la Red REVIRA de vigilancia radiológica del CSN y de otros organismos como la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) o la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCE). Desde 2007, un nuevo sistema informático denominado B3CN (Base de Datos Centralizada y Conexión a las Centrales Nucleares) [13], que sustituye a los antiguos sistemas, proporciona un sistema de recepción y centralización de toda esta información y la canaliza y distribuye posteriormente hacia los diferentes sistemas de evaluación de la SALEM, entre los que se encuentra el sistema RODOS. En este caso, el sistema B3CN, se encarga de alimentar los sistemas de información externos, estructurados de acuerdo a las necesidades de RODOS. El CIEMAT se está encargando de preparar las interfaces de adquisición, lectura y procesamiento de los datos de estos sistemas para adaptarlos a los formatos de recepción que necesita RODOS en sus diversas variantes de funcionamiento (automático o interactivo, modo de operación normal o de emergencia). Se describen a continuación estos procesos según la fuente de datos que se trate.

### ***Datos de pronóstico meteorológico.***

Los datos de pronóstico meteorológico resultantes de los modelos numéricos de predicción (NWP) alimentan tanto los módulos de transporte y dispersión atmosférica de corto alcance (Ficheros LSMC-NWP) como de largo alcance (Ficheros MATCH-NWP). En España, la AEMET se encarga de proporcionar estos datos, seleccionados y procesados a partir de las predicciones de diferentes variables meteorológicas en superficie y en niveles de presión generadas por el modelo numérico de alta resolución HIRLAM<sup>11</sup> en el área europea, y de acuerdo a las prescripciones técnicas elaboradas en su día por el CSN [14] siguiendo el formato requerido por RODOS [15]. A tal fin, el CSN dispuso un servidor dónde, a través del B3CN, se reciben y almacenan de forma continua estos ficheros de datos. El CIEMAT se ha encargado de verificar la información recibida y la adecuación de la estructura de los ficheros a los requisitos actuales de JRODOS. En conjunto el proceso seguido para la incorporación de los datos NWP se puede resumir como sigue:

1. Especificación de las zonas a cubrir por los datos. Los dominios de evaluación se establecieron con el tamaño y resolución horizontal de la malla de datos meteorológicos más adecuada al alcance pretendido.

Definición del proveedor y los datos a recibir. Para cada zona de evaluación se relaciona el directorio de recepción de los datos dispuesto en el servidor del CSN (~CSN\_ServerHOME/AEMET/<RTypeName>/<ProvRTypeName>) con un proveedor registrado en JRODOS a través de la interfaz "NWP Provider Options". El formato de los ficheros de datos, con los parámetros y niveles meteorológicos considerados en cada uno, el número de pasadas que se reciben y el alcance y resolución temporal de los pronósticos, constituyen los parámetros que caracterizan al proveedor en la base de datos de RODOS. La Tabla 1 recoge las características de cada proveedor.

---

<sup>11</sup> <http://hirlam.org/>



**Tabla.1** Características que definen los proveedores nacionales de datos NWP para JRODOS

Escala	Servidor AEMET <RtypeName>	Proveedor <ProvRtypeName>	Características de los ficheros de datos					
			Dominio	Resolución horizontal	Formato	Frecuencia (pasadas/día)	Alcance del pronóstico	Resolución temporal
Escala Local	\ALSMC Espania	\inm1	Vandellós/Ascó <sup>2</sup>	10x10 km	RODOS (ASCII)	Cada 6 h (4)	36 h	1 h
		\inm2	Cofrentes <sup>1</sup>					
		\inm3	Almaraz <sup>1</sup>					
		\inm4	Santa María de Garoña <sup>1</sup>					
		\inm5	Trillo/José Cabrera <sup>2</sup>					
Rango lejano	\MATCH	\Espania-INM1	Europa	48x48 km	HIRLAM (GRIB)	Cada 6 h (4)	48 h	3 h
		\Espania-INM2	Península y Baleares	16x16 km				

1. 180 x 180 km; 2. 220 x 220 km

Importación de los ficheros de datos desde el servidor de recepción a la base de datos PrognosisDB de RODOS. Se puede realizar: Manualmente, buscando el directorio que contiene los ficheros de pronóstico para un proveedor determinado; Automáticamente, colocando los ficheros en el directorio de recepción de datos para el modo automático. Para ello, el CIEMAT ha preparado un procedimiento de copia automatizada y programada de los datos desde el servidor a este directorio de recepción de datos de JRODOS. Según se trate, este directorio se localiza en distintas partes del sistema. Para los ficheros LSMC-NWP, el directorio se crea automáticamente al registrar el proveedor de datos en: *~JRODOS-HOME/JRodosServer/Automatic/NNWP/<ProvRtypeName>*. Para los ficheros MATCH-NWP, el directorio de destino se localiza en: *~JRODOS-HOME/JRodosServer/RodosHome/rome/<ProvRtypeName>/eu* [16].

#### **Observaciones de datos meteorológicas y medidas en tiempo real.**

Las observaciones de datos meteorológicos y las medidas radiológicas obtenidas en tiempo real se utilizan en JRODOS para realizar los cálculos de diagnóstico y para extrapolar la situación diagnosticada en un futuro. Se diferencian entre observaciones meteorológicas, medidas del término fuente o radiológicas de otro carácter. Mientras que los primeros son imprescindibles para ejecutar el modo automático de JRODOS, para el término fuente se pueden usar pronósticos o estimaciones del mismo y las otras medidas radiológicas se usan, en su caso, para la visualización y comparación con los resultados y como entrada en los módulos de asimilación de datos, como IAMM.

El CSN dispone, actualmente, de datos en tiempo real procedentes de las centrales nucleares (CCNN), tanto de observaciones meteorológicas como de medidas radiológicas en el entorno del emplazamiento, y de datos procedentes de la Red de Alerta a la Radiactividad (RAR)<sup>12</sup> o las Redes de Estaciones Automáticas del CSN (REA)<sup>13</sup> y autonómicas. Dependiendo de la fuente de datos, el sistema B3CN recibe y almacena de forma continua estos ficheros de datos en sistemas de almacenamiento intermedio. Desde estos se envía la información, en el formato adecuado, a los directorios de recepción de datos de JRODOS a través de una interfaz de comunicación, preparada al efecto por CIEMAT. Como en el caso anterior, el proceso de incorporación de estos datos en el sistema JRODOS, requiere el registro previo de los proveedores de datos [16], a través de la interfaz “*Register site to provider mapping*”, relacionando cada uno con el emplazamiento y el tipo de medidas que le proporciona, ya sea de una o varias estaciones.

<sup>12</sup>

[http://www.proteccioncivil.es/es/Riesgos/Riesgos\\_Tecnologicos/Nucleares\\_y\\_radiologicos/Recursos.htm](http://www.proteccioncivil.es/es/Riesgos/Riesgos_Tecnologicos/Nucleares_y_radiologicos/Recursos.htm)

<sup>13</sup>

[http://www.csn.es/index.php?option=com\\_maps&view=mappoints&Itemid=32&lang=es](http://www.csn.es/index.php?option=com_maps&view=mappoints&Itemid=32&lang=es)

1. **Conexión con los datos de las Centrales Nucleares (CCNN).** En este caso, cada CCNN se asocia a su propio proveedor y dispone de una tabla particular de almacenamiento intermedio. Estas tablas, actualmente, sólo recogen los datos meteorológicos y, en tanto se procede a la migración al nuevo sistema de recepción B3CN, se preparó el procedimiento de transferencia a JRODOS con estas variables. Sobre las tablas de datos de cada CCNN, el programa verifica la entrada de nuevos registros, los transforma al formato JRODOS-rttf y los envía automáticamente al directorio de recepción de datos en automático del sistema JRODOS. Además, se ha preparado una tabla de correlación entre estas variables y todas las potencialmente incorporables, incluyendo las posibles medidas radiológicas, en el marco del proceso de actualización del sistema de almacenamiento intermedio.

**Conexión con la REA y redes autonómicas.** Esta red está integrada por las 25 estaciones automáticas de vigilancia ambiental del CSN y por las que disponen las comunidades autónomas de Valencia, Cataluña y Extremadura, en el entorno de sus CCNNs, y las del País Vasco. Disponen de instrumentación para medir en continuo variables radiológicas (tasa de dosis gamma, concentración de radón, radioyodos, emisores alfa y beta en aire) y variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, precipitación y presión atmosférica) [17]. La totalidad de los datos disponibles se someten a un proceso de generación y envío automático al programa europeo de intercambio de datos de redes automáticas de vigilancia (EURDEP)<sup>14</sup>. El formato EURDEP es compatible con JRODOS por lo que se ha establecido un proceso de copia automática desde el servidor nacional de estos ficheros al directorio de recepción en automático de JRODOS.

**Conexión a la RAR.** La vigilancia radiológica a través de estaciones automáticas se completa con la recepción en el CSN de los datos de las 903 estaciones que integran la RAR de la DGPCE. En este caso sufrirán un proceso similar a la preparada para los datos de las CCNN. Por el momento se han georreferenciado las estaciones de monitorización en una capa *shape* incorporada en RODOS para que se puedan visualizar las medidas en el mapa.

#### **Configuración básica de usuario y regionalización.**

**Configuración y adaptación básica de la interfaz** de usuario, incluyendo la especificación de la zona horaria nacional, la traducción al español de los menús y mensajes, la selección de las preferencias de modelos de cálculo y de sus resultados, preparación de informes automáticos y asignación de los parámetros en automático.

**Datos básicos de entrada.** El sistema JRODOS tiene incorporados los parámetros que caracterizan las CCNNs españolas: nombre, coordenadas, parámetros de operación, zonas de planificación e inventarios. A lo largo de este período se han realizado varias correcciones y actualizaciones de esta información [18]. Se ha preparado, además, una interfaz de transformación del término fuente proporcionado por otras herramientas como RASCAL<sup>15</sup> (Radiological Assessment System for Consequence AnaLysis) al formato XML soportado por JRODOS.

**Información georreferenciada.** Se han actualizado los mapas de densidad de población y de producción agrícola. En el primer caso se ha partido del mapa raster de densidad de población desagregada con *CORINE Land Cover* de la Agencia Europea del Medioambiente<sup>16</sup> [19], sobre el que se ha seleccionado la zona que cubre la Península y Baleares y reprocesado al formato de RODOS, con una resolución de 1 km. En el segundo caso se han actualizado las tablas de datos asociadas al mapa de producción, agrupando y procesando los datos extraídos de las estadísticas agrícolas de 2009 del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino [20], a la estructura y formato de las tablas de JRODOS.

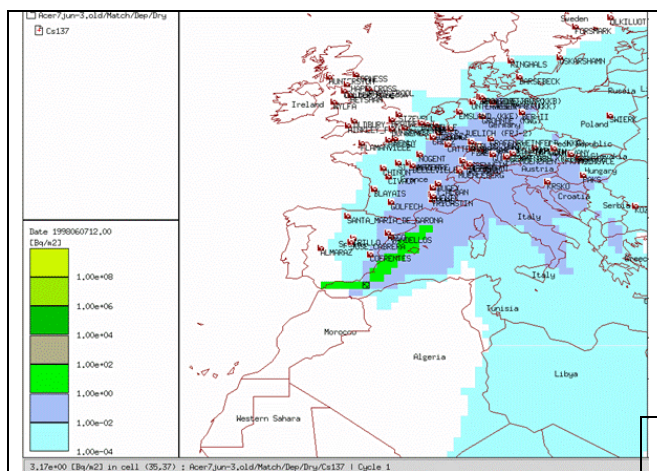
**Análisis y adecuación de RODOS al PE del CSN. Aplicaciones del sistema RODOS para los casos reales.**

<sup>14</sup> <http://eurdep.jrc.ec.europa.eu/Basic/Pages/Public/Home/Default.aspx>

<sup>15</sup> <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/ccc-0553>

<sup>16</sup> <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/>

Se han realizado diversas modelaciones de casos estudio, reales e hipotéticos. Como ejemplo podemos destacar los siguientes casos estudio reales, realizados con sucesivas versiones del sistema:

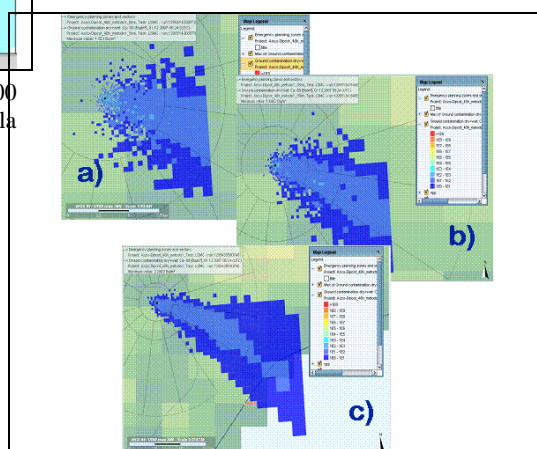


**Fig. 6** Mapa del depósito seco a fecha de 7 de Junio a las 12:00 h. El valor máximo con 3,17E+0 Bq/m<sup>2</sup> se localiza en la proximidades del punto de liberación.

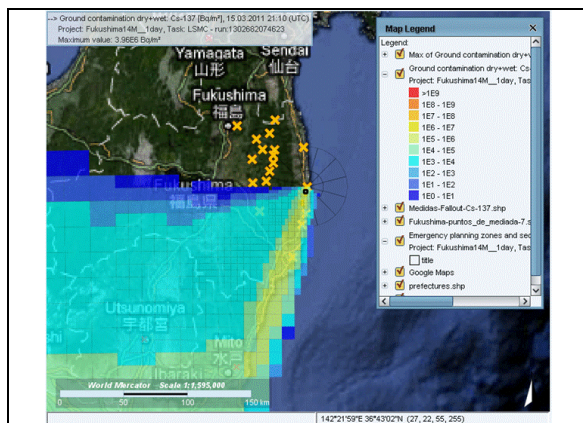
se adecuaban a la realidad observada.

**Incidente en Ascó.** En este caso se han estudiado las posibilidades de utilizar los modelos de dispersión atmosférica incluidos en el sistema JRODOS para modelar la posible dispersión de partículas de tamaño menor de 50 µm en el incidente de liberación de ASCÓ I. Se ha visto que el modelo Lagrangiano en puff para partículas DIPCOT (DISPersion over COMplex Terrain) describe

**Incidente en ACERINOX.** La modelación del incidente de ACERINOX se hizo con el sistema RODOS-LX, utilizando datos meteorológicos reales proporcionados por la AEMET y el modelo de dispersión atmosférica de largo alcance, MATCH. El caso presentaba interés respecto a la gestión de las actuaciones de respuesta a la emergencia en el corto y medio plazo, considerando, además las implicaciones que un incidente local como este pueden tener en nuestros vecinos europeos. La Figura 6 muestra uno de los resultados obtenidos que



**Fig. 7** Deposito integrado de la emisión a las 48 h., Bq/m<sup>2</sup>, estimadas utilizando diferentes resoluciones y dominios de cálculo. a) Dominio del cálculo 8 km, precisión de la celda más fina 100m, b) Dominio del cálculo 16 km, precisión de la celda más fina 200m, c) Dominio del cálculo 40 km, precisión de la celda más fina 500m



**Fig. 3** Vista del resultado obtenido para el depósito de <sup>137</sup>Cs, tras la modelación de la emisión producida el 14 de Marzo a las 21:10 h (UTC) en el reactor nº 2.

sistema JRODOS se presenta como una herramienta útil para realizar el seguimiento de accidentes alejados de nuestro entorno, con importantes repercusiones mediáticas, pero, fundamentalmente, con enorme interés científico. Se ha demostrado su flexibilidad y rapidez para adaptar su interfaz y bases de datos a situaciones y escenarios no previstos, utilizando los recursos IT estándar disponibles y presenta ventajas al poder incorporar los datos reales de la monitorización para comparar con los

adecuadamente la dispersión y depósito de este tipo de partículas liberadas. Entre otras posibilidades se pueden realizar evaluaciones con diferente precisión, según el dominio de cálculo escogido (Figura 7).

**Accidente en Fukushima.** El reciente accidente de Fukushima ha mostrado el indudable interés y preocupación de la comunidad científica y del público, en general, por conocer las posibles consecuencias actuales y futuras que un accidente de estas características puede tener tanto sobre la población local como en el resto del mundo. El



resultados de la modelación, lo que permitiría preparar de forma más realista el proceso de recuperación futuro. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos tras modelizar uno de los eventos de liberación en uno de los reactores.

### Conclusiones.

El sistema JRODOS se revela como una herramienta eficaz, flexible y de uso homologado a nivel europeo para ayudar en la gestión de las emergencias nucleares y radiológicas y en la posterior rehabilitación de los entornos contaminados, tanto en el nivel nacional de respuesta en la primera fase de la emergencia como a nivel regional /local en la preparación de las emergencias y recuperación del entorno con el concurso de los interlocutores sociales interesados. Esta afirmación se fundamenta en las siguientes consideraciones respecto al sistema JRODOS [21]:

Desde un punto de vista del desarrollo técnico y funcional, al ser un producto basado en Java, la nueva versión introduce una solución multiplataforma capaz de funcionar en la mayoría de los sistemas de operación, incluyendo Windows y los principales derivados de UNIX. El sistema de re-ingeniería conserva todos los modelos computacionales de RODOS, que ahora se integran como “plug-ins”. Esto permite una fácil expansión del sistema y facilita el desarrollo independiente de los nuevos modelos. Se apoya en un nuevo Sistema compatible de Información Geográfica (SIG) y en la aplicación de modernas tecnologías de base de datos con posibilidades de una configuración flexible. La funcionalidad de importación incluye la incorporación de archivos de medidas EURDEP y datos meteorológicos en formato GRIB. Además, se han realizado mejoras en las capacidades de modelación de la dispersión atmosférica en el rango cercano y lejano, en el ámbito del seguimiento y la asimilación de datos en las situaciones de emergencia radiológica, en relación con los ejercicios y en el componente de ayuda a la decisión, introduciendo, además, nuevos desarrollos para modelar las contramedidas en medio agrícola y urbano y, finalmente, la aplicabilidad operativa del sistema se ha reforzado con la introducción de una nueva interfaz de usuario.

Además, y no menos importante, desde el punto de vista operativo, el código JRODOS permite una evaluación rápida de la evolución de un suceso con liberación de sustancias radiactivas producto de un accidente nuclear o de un suceso radiológico en cualquier lugar del mapa, ya sean situaciones de accidentes de transporte, explosión de un dispositivo radiactivo, u otras. Sus modelos de dispersión atmosférica a gran distancia (MATCH), basados en los modelos globales de predicción numérica meteorológica (DMI-HIRLAM, por ejemplo), permiten evaluar con gran fiabilidad las consecuencias que tendría en España cualquier escape que pudiese originarse en el resto de Europa, lo que supone un paso esencial para poder acometer la puesta en práctica de las correspondientes medidas de actuación necesarias. Integra todas las fases de una emergencia nuclear, permitiendo una continuidad en la simulación de resultados que antes debían calcularse con programas diferentes. Permite tanto la simulación y zonificación de las medidas de protección urgentes (confinamiento, evacuación y profilaxis radiológica con yodo estable) de acuerdo a los niveles de intervención establecidos para cada caso, como la simulación de las medidas de protección de larga duración, típicas de la fase de recuperación con módulos especiales para tomar decisiones sobre descontaminación urbana y traslados de larga duración, sobre la gestión de entornos agropecuarios contaminados y de las producciones agrícolas y ganaderas, o evaluar la contaminación de las aguas y cadenas alimenticias relacionadas.

**AGRADECIMIENTOS:** Los trabajos de demostración e implementación del sistema RODOS en España han recibido financiación parcial del 6º Programa Marco de la Comisión Europea (Programa de I+D sobre Energía Nuclear EURATOM (2002-2006), bajo el proyecto EURANOS (*EUropean Approach to Nuclear and radiological emergency management and rehabilitatiOn Strategies*) contract no. FI6R-CT-2004-508843 y del CSN, bajo el acuerdo de colaboración conjunta CSN-CIEMAT-UPM, ISIDRO (*Integración del Sistema de ayuda a la Decisión RODos en la sala de emergencias (SALEM) del CSN*), y del trabajo técnico ACCROS (*Actualización, configuración y adaptación básica al entorno español del sistema JRODOS instalado en la SALEM del CSN*, P2010/341).

### REFERENCIAS

[1] Ehrhardt, J.; Weis, A. (eds). RODOS: Decision support system for off-site nuclear emergency management in Europe. European Commission, Brussels, Report EUR 19144. 2000.



- [2] Raskob, W.; Gering, F.; Lochard, J. Nisbet, A. Starostova, V.; Tomic B. Overview and main achievements of the EURANOS project: European approach to nuclear and radiological emergency management and rehabilitation strategies. Radioprotection 2010, 45(5):S9-S22.
- [3] Schulte, E.-H.; Nelly, G.N.; Jackson, C.A. Decision support for emergency management and environmental restoration. European Commission, Brussels, Report EUR 19793. 2002.
- [4] The RODOS System. Version PV6.0. Forschungszentrum Karlsruhe. 2005.
- [5] Rodos Version 7 handbook for HP and Linux (2010). Internet: <http://www.rodos.fzk.de/rodos.html>
- [6] Raskob, W.; Hugon, M. (eds.). Enhancing nuclear and radiological emergency management and rehabilitation. Key results of the EURANOS European Project. Radioprotection, 45(5). 2010
- [7] Ievdin, I.; Trybushnyi, D.; Zheleznyak, M.; Raskob, W. RODOS re-engineering: aims and implementation details. Radioprotection, 45(5):S181-S189. 2010.
- [8] Gering, F.; Gerich, B.; Duranova, T.; Bohun, L.; Ammann, M.; Fritsch, G.; Hofer, P.; Twenhöfel, C.; de Ridder, M. User requirements for the re-design of RODOS in phase 2 of the EURANOS project. Report Técnico Interno EURANOS(CAT2)-TN(06)-09. 2006.
- [9] Ukrainian Centre for Environmental and Water Projects. JRODOS User Guide. Version 1.4. 2010
- [10] Müller, T.; Raskob, W.; Vaziri Elahi, S. User friendly application of RODOS. Radioprotection, 45(5):S171-S179. 2010.
- [11] Müller, T. Vaziri Elahi, S. User's Guide to RODOS-Lite. Version 2.0. 2007.
- [12] Ministerio del Interior, 2004. Plan Básico de Emergencia Nuclear. Real Decreto 1546/2004. Boletín Oficial del Estado, 14 de Julio de 2004.
- [13] SATEC. Base de Datos Centralizada y Conexión a las Centrales Nucleares. Casos de Éxito, nº17.
- [14] Franco, F. RODOS en el CSN. Informe Técnico interno. 2006
- [15] Raskob, W. (ed). Guidance on adaptation of RODOS to national conditions. Report RODOS(RA1)-TN(01)-03. Version 4.0. 2008
- [16] Ievdin, I.; Trybushni, D.; Landman, C. JRodos Customisation Guide. Version 2.1. 2010.
- [17] Parages, C.; García, J.P.; De la Vega, R. Red de estaciones automáticas de vigilancia radiológica ambiental (REA) del CSN. Operación y resultados Años 2006 y 2007. Colección Informes Técnicos INT-04.18. Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid. 2009.
- [18] Franco, F. Revisión, actualización y corrección de los datos relativos a las CCNN españolas en la Base de Datos Fija de RODOS. Report interno CSN CSN/TGE/SEM/0505/1857, revisión 2008.
- [19] Gallego, F. A population density grid of the European Union, Population and Environment. 31: 460-473. 2010
- [20] Camacho, A.; García, R.; Rábade, M.T; López, J.J. Anuario de Estadística 2009. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Estadística Madrid, 2010
- [21] Gallego, E.; Iglesias, R. Informe sobre el sistema JRODOS. Novedades, capacidades y adecuación. Report ISIDRO CTN-01/10 (ver. 1.0). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 2010.